

## EGR 배기가스의 성층화 조건에 따른 HCCI 엔진의 연소 특성에 관한 수치해석 연구

이 원 준<sup>1)</sup> · 이 승 로<sup>2)</sup> · 이 창 언<sup>\*2)</sup>

인하대학교 대학원 기계공학과<sup>1)</sup> · 인하대학교 기계공학과<sup>2)</sup>

### A Numerical Study on Combustion Characteristics of HCCI Engine with Stratification Condition of EGR Exhaust Gases

Won Jun Lee<sup>1)</sup> · Seungro Lee<sup>2)</sup> · Chang-Eon Lee<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received 24 December 2010 / Accepted 1 June 2011)

**Abstract** : Homogeneous charge compression ignition (HCCI) is the best concept able to provide low NO<sub>x</sub> and PM in diesel engine emissions. This new alternative combustion process is mainly controlled by chemical kinetics in comparison with the conventional combustion in internal combustion engine. However, HCCI engine's operation have an excessive rate of pressure rising during the combustion process. In this study, stratification condition of EGR exhaust gases was used to reduce the pressure rising during the combustion process in HCCI engine. Also, combustion characteristics and emissions characteristics were investigated using the detailed diesel surrogate reaction mechanism.

**Key words** : HCCI engine(예혼합 압축 착화 엔진), Diesel surrogate(디젤 대응), Stratification(온도 성층화), EGR exhaust gas(EGR 배기가스), Combustion and emission characteristics(온도 및 배기 특성)

#### Nomenclature

$L_C$  : connecting rod length  
 $L_A$  : crank arm radius  
 $V_C$  : clearance volume  
 $D$  : cylinder bore diameter  
 $C$  : compression ratio  
 $V_d$  : displacement volume  
 $P_m$  : motored cylinder pressure  
 $P$  : instantaneous cylinder pressure  
 $T_r$  : working-fluid temperature  
 $V_r$  : working-fluid volume

$P_r$  : working-fluid pressure  
 $\overline{S_p}$  : piston speed(=  $2L_A\omega$ )  
 $\omega$  : average cylinder gas velocity

### 1. 서론

전 세계적으로 대기오염 규제의 강화로 인해 자동차의 유해가스를 줄이기 위한 많은 노력들이 이루어지고 있다. 그 중 균질 예혼합 압축착화(HCCI) 연소 방식은 현재 디젤 엔진에서 발생하는 NO<sub>x</sub>와 PM을 획기적으로 줄일 수 있는 기술로 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>1,2)</sup> 하지만 현재 균질 예혼합 연소 방식은 특별한 점화 장치 없이 연료의 화학적인 특성만으로 점화가 이루어지기 때문에, 착화시기의 조절 및 좁은 운전영역에 대한 과제가 남아있다. 더

\*Corresponding author, E-mail: chelee@inha.ac.kr

속이 높은 압축비로 인하여 고부하 영역에서 짧은 연소기간 동안 급격한 열 발생으로 인하여 큰 압력 상승률이 발생하며, 이로 인해 노킹은 물론 엔진의 내구성의 문제를 가져온다. 이 문제를 해결하기 위해 온도 및 농도의 성층화를 통해 압력상승률을 낮추고 노킹을 줄이고자 하는 많은 노력들이 이루어지고 있다.<sup>3,4)</sup> 하지만, 온도 및 농도 성층화의 경우 실제 엔진에서 자연적으로 발생하지 않으며 인위적으로 구현하기에도 많은 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 EGR을 통한 배기가스의 농도 및 온도 성층화 조건을 제안하고, 이에 따른 HCCI 엔진의 압력 상승률 및 배기 특성을 규명하고자 한다. 또한 EGR률을 30%를 기준으로 하여 연료 및 공기 혼합기와 EGR에 의한 배기가스의 혼합물에 따른 두개의 농도 성층화조건과 이에 따른 온도 성층화 조건을 고려하여, 이에 따른 온도 및 압력 상승률과 연소 특성은 물론 NO 및 CO등의 배출 특성을 규명하였다.

## 2. 수치해석 방법 및 성층화 조건

### 2.1 계산 방법

모사 계산은 Sandia National Lab.에서 개발한 CHEMKIN-package의 SENKIN모델을 수정하여 수행하였다.<sup>5)</sup> 즉, 정적 연소 모델인 SENKIN모델을 대상으로, 시간변화 즉 크랭크 앵글의 각도에 따른 실린더 내부의 체적변화를 고려하여, 엔진 연소장을 모사하였으며, 계산에 사용된 식은 다음과 같다.

$$\frac{d(V/V_c)}{dt} = \Omega \left( \frac{C-1}{2} \right) \sin\theta \left[ 1 + \frac{\cos\theta}{\sqrt{R^2 - \sin^2\theta}} \right] \quad (1)$$

$$R = \frac{L_C}{L_A} \quad (2)$$

$$C = \frac{V_{s,max} + V_c}{V_c} \quad (3)$$

$$V_{s,max} = \frac{\pi}{2} D^2 L_A \quad (4)$$

$$w = \left[ C_1 \bar{S}_p + C_2 \frac{V_d T_r}{P_r V_r} (P - P_m) \right] \quad (5)$$

열전달 모델은 Woschni correlation을 사용하였으며,<sup>6)</sup> 모사계산에 사용된 엔진 제원은 Table 1에 상세

Table 1 Specifications of the engine

Compression ratio	16.7
Bore	127 mm
Stroke	154 mm
Connecting rod length	255 mm
Inlet calve opening	367 CAD ATC
Inlet calve closing	581 CAD ATC
Exhaust calve opening	121 CAD ATC
Exhaust calve closing	349 CAD ATC

히 표기 하였다.<sup>7)</sup> 압축비는 16.7로 고정하였으며, 엔진스피드는 900 RPM, 당량비는 0.3으로 계산을 수행하였다. 초기온도는 380K으로 계산을 수행하였는데, 이는 혼합기 형성시 기화되지 않은 연료가 실린더 벽면이나 피스톤 링 사이에 들어가 불완전 연소가 발생하는 것을 방지하기 위해 헵탄의 기화 온도를 고려하여 선정하였다. 계산에 사용된 반응 기구는 기존에 Andrae와 Hernadeze에 의해 제안된 diesel surrogate를 수정하여 본 연구자에 의해 제안된 반응 기구로, LLNL n-heptane detailed version3 mechanism, Alzueta benzene mechanism, Sivaramakrishnan toluene mechanism, Andrae surrogate mechanism, San Diego's NOx mechanism 을 조합한 것으로 총 754 화학종과 3,310 반응식으로 구성되어 있다.<sup>8-10)</sup>

### 2.2 계산 조건 및 성층화 조건

계산에 사용된 EGR 배기가스의 조성은, 당량비 0.3에서 완전 연소를 가정하여 생성되는 생성물의 주요 물질인 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>를 대상으로 계산하여, 공기 연료 혼합가스와 섞어 전체 혼합가스를 재계산하여 사용하였다.

Table 2는 본 연구에서 사용된 성층화 조건을 나타낸 것으로, Table 2에 표시된 EGR은 각 zone의 EGR률을, Temp.는 초기온도를 나타낸다. 계산을 위해, 먼저 EGR률 30%를 기준으로 하고 이를 기준으로 5%씩 차등을 두어 15% ~ 45%의 EGR률로 영역별 설정을 하고 계산을 수행하였다. EGR 쿨링을 통한 온도 조건을 고려하기 위해 초기에는 EGR 배기가스의 온도를 380K로 설정하였으며, EGR 배기가스의 혼합물에 따른 온도 성층화 조건을 고려하여 영역별 온도를 변화시켜가며 계산을 수행하였다. 또

Table 2 Specifications of the engine

CASE	Zone	1	2	3	4	5	6	7
	VOL	0.1	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1
1,6	EGR (%)	30	30	30	30	30	30	30
	Temp. (K)	380	380	380	380	380	380	380
2	EGR (%)	15	20	25	30	35	40	45
	Temp. (K)	380	380	380	380	380	380	380
3	EGR (%)	15	20	25	30	35	40	45
	Temp. (K)	365	370	375	380	385	390	395
4	EGR (%)	15	20	25	30	35	40	45
	Temp. (K)	380	385	390	395	400	405	410
5	EGR (%)	15	20	25	30	35	40	45
	Temp. (K)	380	390	400	410	420	430	440
7	EGR (%)	0	10	20	30	40	50	60
	Temp. (K)	380	380	380	380	380	380	380
8	EGR (%)	0	10	20	30	40	50	60
	Temp. (K)	365	370	375	380	385	390	395
9	EGR (%)	0	10	20	30	40	50	60
	Temp. (K)	380	385	390	395	400	405	410
10	EGR (%)	0	10	20	30	40	50	60
	Temp. (K)	380	390	400	410	420	430	440

한 EGR 배기가스의 혼합비에 따라 EGR률을 0 ~ 60% 까지 10%씩 차등을 주어 7개의 영역으로 나누어 계산을 수행하였으며, 역시 이 경우에도 영역별 성층화 조건을 고려하여 온도를 변화시켜 가며 계산을 수행하였다. 조건별 자세한 각 영역별 체적비는 Table 2에서 보여지는 바와 같다.

### 3. EGR에 따른 연소 특성

Fig. 1은 성층화 조건에 따른 압력선도를 나타낸 것이다. 그림에서 각 그래프의 기울기가 압력 상승률을 의미하며, 먼저 CASE 1의 경우 성층화를 하지 않은 조건에서 압력상승률이 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 짧은 시간동안 엔진에 큰 힘을 가하기에 엔진 내구성의 문제는 물론 소음과 진동에 큰 영향을 미칠 수 있다. CASE 2의 경우, 온도는 일정하게 한 상태에서 EGR 배기가스의 농도를 5%단위로 성층화한 것인데 압력상승률이 CASE 1에 비해 작아진 것을 알 수 있다. 물론 최고 압력이 낮아진 것도 압력상승률 저감에 영향을 주지만 그것보다 압력이 상승하는데 걸리는 시간이 크게 증가한 것을 알 수 있다. CASE 3~5의 경우는 EGR 배기가스의

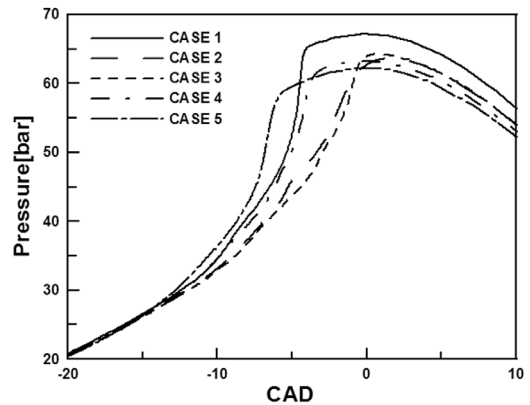


Fig. 1 Pressure profiles with stratification conditions

농도 성층화 조건에 온도 성층화 조건을 적용시킨 것으로, 결과에서 보듯이 온도 성층화 조건을 크게 할수록 압력 상승률이 작아지지만 농도 성층화조건보다 효과가 다소 작은 것을 알 수 있다.

먼저, 성층화를 하지 않은 조건에서 HCCI 엔진에서의 EGR에 따른 연소 특성을 살펴보기 위하여, 헵탄 65%, 톨루엔 35%의 조성을 가지는 혼합연료에 대해, 당량비 0.3, 초기 온도 380K로 계산을 수행하였다. 본 조건을 위해 사용된 엔진 조건은 Table 1과 동일하다. 먼저, Fig. 2는 EGR률에 따른 화염의 최대 온도와 NO 배출량을 나타낸 것으로, 그림에서 보듯이 EGR률이 증가함에 따라 화염온도는 감소하는 것을 보이며 NO 역시 온도와 같은 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 EGR 배기가스의 CO<sub>2</sub>의 영향에 의한 온도 감소가 주된 원인으로 이로 인해 NO의 생성량 역시 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 EGR률이 10%까지는 NO의 양이 급격히 감소하며 그 이후에는 감소율이 작아지는 것을 알 수 있다. 보통 예혼합 화염에서 NO 발생은 온도의 영향을 가장 많이 받는 thermal NO에 의해 좌우되며, 특히 1800K이상의 고온에서 많이 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>9,11)</sup> 그림에서 EGR률이 10% 일때의 화염온도는 1800K이며, 이 사실로부터 1800K이상에서 온도가 증가하면 NO의 발생률이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 화염온도를 1800K이하의 저온 연소의 경우, NO의 발생량을 크게 줄일 수 있으며 EGR률을 10% 이상 할 경우 NO 생성량을 크게 저감할 수 있음을 보여주는 예라 하겠다.

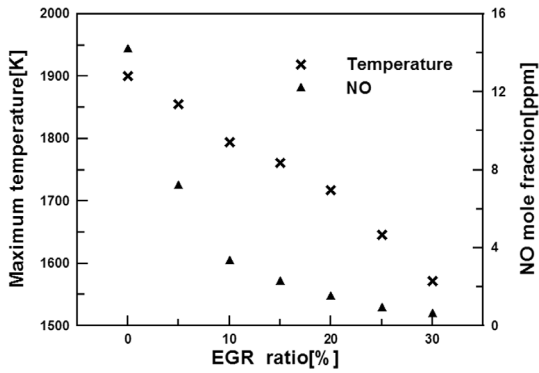


Fig. 2 Maximum temperature and NO mole fraction with EGR ratio

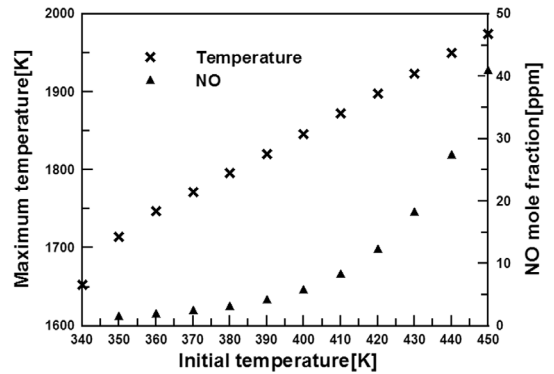


Fig. 4 Maximum temperature and NO mole fraction with initial temperature

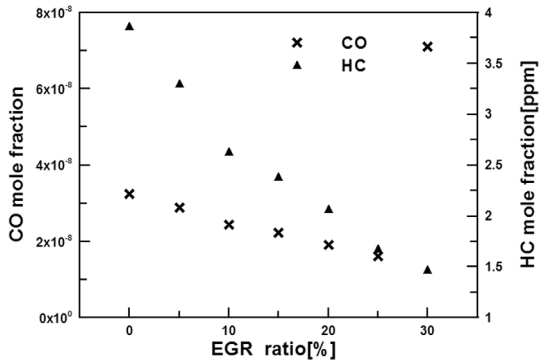


Fig. 3 CO and HC mole fraction with EGR ratio

Fig. 3은 EGR률에 따른 CO와 HC의 생성량을 나타낸 것이다. CO의 경우 EGR률이 증가 할수록 감소하다가 EGR률이 25%가 되는 지점에서 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 EGR가스에 포함된 H<sub>2</sub>O에 의해 OH라디칼의 생성량이 증가하여 CO가 CO<sub>2</sub>로 산화하는 반응이 증가하여 EGR률이 25%이 하인 지점에서 CO의 발생량이 감소하나 25%이후에서는 불완전 연소율이 급격히 증가하여 CO의 생성량이 급증하는 것으로 사료된다. 하지만 대부분의 실험 결과에서는 EGR률이 증가하면 CO가 증가하는데 이것은 EGR쿨러로 인하여 배출가스에 포함되어 있는 H<sub>2</sub>O가 응축되어 엔진내로 들어가지 않기 때문이다. 한편, HC의 경우 EGR률이 증가할수록 감소되는 것을 알 수 있으며 그 양은 EGR률이 증가함에 따라 꾸준히 감소하는 것을 확인 하였다. 이것은 EGR률이 증가할수록 엔진내로 공급되어지는 혼합가스의 연료의 양이 감소하기 때문으로 사료된다.

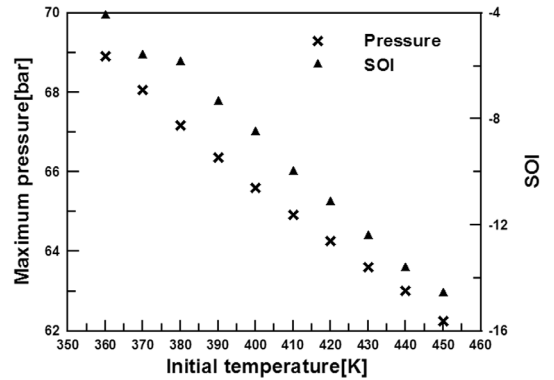


Fig. 5 Maximum temperature and start of ignition with initial temperature

Fig. 4는 EGR 20%를 기준으로 초기 온도의 변화에 따른 최고 온도와 NO의 생성량을 나타낸 그림이다. EGR의 경우 쿨링의 정도에 따라 온도의 영향을 미치며 온도가 높아질수록 NO의 생성량에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 특히 초기온도가 390K 이상일 경우 화염 온도가 1800K 이상이 되어 NO의 생성량이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 물론 기존의 디젤 엔진에 비해서는 매우 작은 양이지만, 초기 온도의 경우 착화시기에도 큰 영향을 미치기 때문에 EGR 배기가스의 쿨링은 필수적이며, EGR 배기가스를 포함한 혼합기 온도의 조절은 매우 중요한 인자이다. 그리고 초기 온도 증가량에 비해 화염 온도의 증가량이 다소 작은 양이지만 이후 화염 온도가 더욱 증가하면 NO의 생성량은 매우 크게 증가하기 때문에 초기 온도를 일정 이하로 낮추어야 함을 알 수 있다.

Fig. 5는 EGR률을 20%인 경우의 초기 온도에 따른 최고 압력과 착화시기를 나타낸 그림이다. 착화시기(start of ignition: 이하 SOI)의 경우 총 열발생률의 10%되는 지점으로 계산하였다. 헵탄의 경우 저온 산화 과정에서 전체 열 발생률의 5%정도의 열을 발생시키기 때문에 10% 지점을 2차 산화 반응 시점 즉 착화시기로 결정하였다. 최고 압력을 보면 초기 온도가 증가할수록 그 값이 작아지는 것을 확인할 수 있는데 이것은 초기 온도의 증가로 인해 연소가스의 온도가 더 빠르게 증가하여 착화시기가 빨라지기 때문으로 사료된다. 이것은 초기온도가 증가할수록 착화시기가 빨라지며 이로 인해 상사점 부근에서 착화가 이루어지지 않고 피스톤이 상승하는 부분에서 점화가 이루어져 최고 압력이 낮아진다.

#### 4. 성층화 조건에 따른 연소 특성

Fig. 6은 Table 2에서 제시된 CASE 1에서 5까지의 성층화 조건을 고려하여 계산된 계산장의 최고 온도 및 최고 압력을 나타낸 것이다. CASE 1은 성층화를 하지 않는 조건으로 초기온도는 380K이고 EGR률은 30%이며, CASE 2는 CASE 1과 온도 분포는 같지만 EGR률의 성층화 조건을 고려한 것이며, CASE 3, 4와 5는 CASE 2의 평균온도를 380K를 기준으로 5K씩 온도 성층화 조건을 고려한 것이다. 그림에서 보듯이 최고온도와 압력의 분포는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 7은 CASE 1~5까지의 성층화 조건에서 발생하는 CO 및 NO의 발생량을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이, CASE 2의 경우에서 CO의 발생량이 급격히 증가하는 현상을 보이는데, 그 양의 증가가 매우 큰 것을 알 수 있다. 이 원인을 알아보기 위해 Fig. 8에 CASE 2의 각 Zone의 온도 및 CO발생량을 나타내었다.

Fig. 8에서 보듯이 Zone 6과 7의 경우 CO 발생량이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 온도가 1400K이하인 지점에서 불완전 연소가 급격히 증가하여 CO의 발생량이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 CASE 3~5의 경우에는 Zone 6과 7에서의 초기온도가 높기 때문에 화염온도가 증가하여 CO의 발생량이 많지 않기 때문에 CASE 2의 경우만 CO

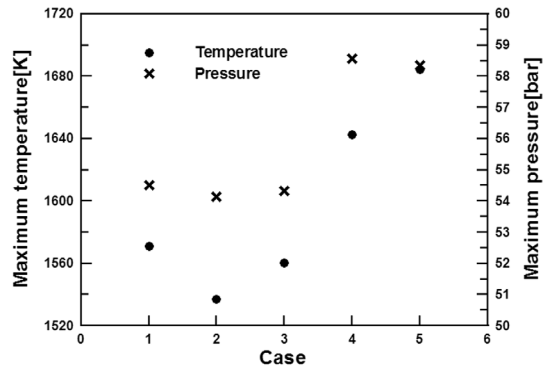


Fig. 6 Maximum temperature and maximum pressure with varying stratification conditions (CASE 1 to 5)

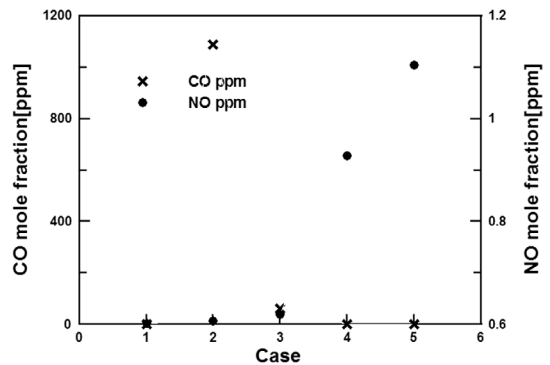


Fig. 7 CO and NO mole fraction with varying stratification conditions (CASE 1 to 5)

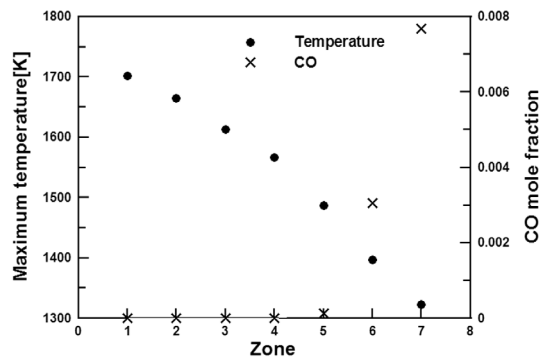


Fig. 8 Maximum temperature and CO mole fraction at each zone of CASE 2

의 발생량이 큰 것을 알 수 있다. 한편, CASE 4와 5의 경우 NO의 발생량이 CASE 1~3에 비해 다소 증가하는 것을 알 수 있는데 이것은 초기온도 증가로 인한 화염온도의 증가가 원인인 것으로 사료되며 그 양은 그리 크지 않다. 따라서 EGR 배기가스의 성

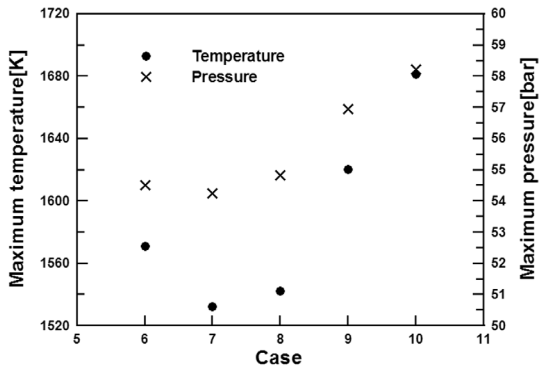


Fig. 9 Maximum temperature and maximum pressure with varying stratification conditions (CASE 6 to 10)

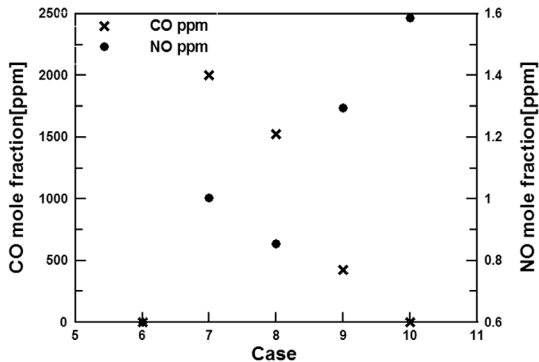


Fig. 10 CO and NO mole fraction with varying stratification conditions (CASE 6 to 10)

층화를 5% 씩 적용한 경우, CASE 2의 CO 농도가 급격히 증가하는 것을 제외하고는 유사한 결과를 얻어, 사용에 문제가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 Table 2의 CASE 6에서 10까지의 성층화 조건별, 계산장의 최고 온도와 최고 압력을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 모든 CASE에서, 최고 온도 및 최고 압력의 경우 큰 차이가 없으나, CASE 9와 10의 경우에서 다소 큰 값을 보임을 알 수 있다. 이는 CASE 9와 10의 경우 초기 평균 온도가 높아 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 10은 CASE 6~10의 CO와 NO의 생성량을 나타낸 것이다. NO의 경우 CASE 9와 10의 경우 다소 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 역시 초기 온도 증가에 의한 것이며 그 증가양이 매우 적다. 하지만 CO의 경우 CASE 7과 8의 경우 매우 높게 발생함을 알 수 있는데, 이는 앞에서 서술한 바와 같이

EGR 량의 증가함에 따라 화염온도가 감소하게 되는데 이로 인해 불완전 연소가 증가하여 CO의 발생량이 증가하는 것으로 사료된다. 하지만 CASE 9와 10의 경우 CO의 생성량이 다시 감소하는 것을 알 수 있는데 이것은 EGR 배기가스의 비율이 큰 곳의 경우에도 초기온도가 높아 CO의 발생량은 작아지는 것을 알 수 있다. 다시 말해, EGR률을 높일 경우 그만큼 초기온도를 높게 주어야 CO의 발생량을 줄일 수 있으며, 이로 인한 NO의 발생량의 증가는 거의 없는 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 HCCI 엔진의 연소 특성을 규명하고, HCCI 엔진내의 높은 압력 상승률을 감소시키기 위해, EGR에 따른 연소 특성을 규명하였다. 또한 이를 바탕으로 EGR 배기가스 성층화를 통해 실린더내 온도 및 농도 성층화 조건을 만들어 HCCI 엔진의 연소 특성 및 CO와 NO의 배출 특성을 살펴보았으며, 그 결과 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) HCCI 엔진에서 EGR률을 증가시킬수록 화염온도가 감소하여, NO의 발생량을 줄이지만, EGR률이 25% 이상에서는 CO의 발생량이 급격히 증가함을 확인할 수 있었다.
- 2) EGR 배기가스를 이용한 농도 성층화 조건의 경우, 온도 성층화 조건보다 압력 상승률을 저감하는데 효과적이었다.
- 3) 모든 성층화 조건에서 화염온도 및 최고 압력의 경우 큰 차이가 없으며, NO의 발생량에서도 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.
- 4) CO 배출량의 경우, EGR 배기가스의 비율이 높은 곳에서는 화염온도가 1400K 이하로 내려가 발생량이 크게 증가하지만, 온도 성층화 조건의 초기온도를 조절하는 방법으로 해결할 수 있음을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부 지정 인하대학교 자동차동력계부품 지역혁신센터의 지원에 의한 것입니다.

## References

- 1) I. Orlandini, A. Kulzer, F. Weberbauer and M. Rauscher, "Simulation of Self Ignition in HCCI and Partial HCCI Engines using a Reduced Order Model," SAE 2005-01-02159, 2005.
- 2) G. Bression and D. Soleri, "A Study of Methods to Lower HC and CO Emissions in Diesel HCCI," SAE 2008-01-0034, 2008.
- 3) O. S. Kwon and O. T. Lim, "Effect of Thermal Stratification for Pressure Rise Rate in HCCI Combustion Based on Multi-zone Modeling," Transactions of KSAE, Vol.17, No.4, pp.32-39, 2009.
- 4) M. Sjoberg, J. E. Dec and N. P. Cernansky, "Potential of Thermal Stratification and Combustion Retard for Reducing Pressure-rise Rates in HCCI Engines, Based on Multi-zone Modeling and Experiments," SAE 2005-01-0113, 2005.
- 5) R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-phase Chemical Kinetics, SAND89-8009, Sandia National Laboratories, Livermore, California, 1989.
- 6) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Inc., Singapore, pp.678-680, 1988.
- 7) J. Andrae, D. Johansson, P. Bjornbom, P. Risberg and G. Kalghatgi, "CO-oxidation in the Auto-ignition of Primary Reference Fuels and N-heptane/Toluene Blends," Combustion and Flame, Vol.140, No.4, pp.267-286, 2005.
- 8) J. C. G. Andraee, T. Brinck and G. T. Kalghatgi, "HCCI Experiments with Toluene Reference Fuels Modeled by a Semidetailed Chemical Kinetic Model," Combustion and Flame, Vol.155, No.4, pp.696-712, 2008.
- 9) J. J. Hernandez, J. S.-Argent, J. Benajes and S. Molina, "Selection of a Diesel Fuel Surrogate for the Prediction of Auto-ignition under HCCI Engine Conditions," Fuel, Vol.87, No.6, pp.655-665, 2008.
- 10) W. Lee, S. Lee and C.-E. Lee, "A Study on the Detailed Diesel Surrogate Chemical Mechanism for Analysis of HCCI Engine," Transactions of KSAE, Vol.19, No.4, pp.64-71, 2011.
- 11) Y. H. Choi and C. E. Lee, "NO<sub>x</sub> Formation Characteristics in Diffusion, Partial Premixed and Premixed Jet Flame," 17th KOSCO Symposium, Vol.17, pp.155-164, 1998.